

Глава 20

ЕЛЕМЕНТАРНИ ЧАСТИЦИ

§ 20.1. Лептони

Разпространение на лептоните; уравнение на Дирак и позитрон; мюон и мюонно неутрино; тау-лептон; лептонно число и лептонен заряд; лептоните – точкови образувания; открития. 502

§ 20.2. Адрони

Бариони, антибариони и мезони; бариони – схема на частици с маса до 1,2 GeV; странност; барионен октет; барионен декаплет; мезони; мезонен нонет. 504

§ 20.3. Кварки

Експеримент на SLAC; кварки и ароматите им; струна; разделяне на кварките; свидетелства – Гел-Ман и Цвайг, нееластично разейване на електрони от протон, струи, при аниhilация. 510

§ 20.4. Големият взрив и космология

Началото – Големият взрив; космология и четири фундаментални факта; изстиване и критична температура; схема; разделяне на взаимодействията; кратко за еволюцията на Вселената – ери; хелиевото количество и реликтовото излъчване. 514

ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА

1. Allday J., Quarks, Leptons and the Big Bang, 2nd ed., IPP, 2002, ch. 1, 5.
2. Балабанов Н., Ядрена физика, Пловдивско УИ, 1998, Пловдив, гл. 8.
3. Young H. and R. A. Freedman, University Physics, 12th ed., Pearson Educ., Inc., 2008, San Francisco, ch. 44.
4. Уилямс У. С. С., Физика на ядрото и елементарните частици, УИ „Св. Климент Охридски“, 2000, София, гл. 13, 14.

§ 20.1. ЛЕПТОНИ

Лептоните за разлика от кварките могат да съществуват като отделни обекти. (Силното взаимодействие съединява кварките в частици и никога не може да бъде изучен единичен кварк.) Затова реакциите им са по-лесно обясними и достъпни. Освен това лептоните сравнително лесно могат да бъдат намерени в природата (табл. 20.1) и имат важна роля в реакциите на елементарните частици и в атома.

Таблица 20-1. Разпространение на лептоните

1-во поколение	2-ро поколение	3-то поколение
<p>Електрон</p> <p>1. в атомите; 2. движещият се електрон определя тока; 3. създава се при β-радиоактивност.</p>	<p>Мюон</p> <p>1. създава се в голямо количество в горната атмосфера от космическите лъчи.</p>	<p>Таон</p> <p>1. засега само в лабораториите.</p>
<p>Електронно неутрино</p> <p>създава се:</p> <p>1. при β-радиоактивност; 2. много в реакторите; 3. огромно количество в Слънцето.</p>	<p>Мюонно неутрино</p> <p>създава се:</p> <p>1. в реакторите; 2. в горната атмосфера от космическите лъчи.</p>	<p>Таонно неутрино</p> <p>1. засега само в лабораториите.</p>

Слънцето е най-големият природен източник на двойката електрон – неутрино. Всяка секунда тялото ни се пронизва от 10^{12} такива двойки, основната част са от ядрените реакции на Слънцето. Частиците от второто поколение са по-редки, но те се срещат достатъчно често, за да бъдат добре изучени. (Във физиката на елементарните частици се въвежда понятието *време на живот*, което е средното време на съществуване. Измерено време на живот на мюона е $(2,19703 \pm 0,0004) \cdot 10^{-6}$ s. Тъй като мюоните се произвеждат от космическите лъчи в горните слоеве на атмосферата, за това време те не могат да достигнат Земята. И все пак те са измерени на нея. Тайната на отговора е в гл. 1 – според СТО времето в ОС на движещия се мюон тече много бавно и е достатъчно мюонът да достигне до Земята.) Обаче частиците от третото поколение не се срещат в нито един природен процес. Но в много ранни времена Вселената е била значително по-гореща и частиците са имали висока енергия и членовете на третото поколение са произвеждани често в реакциите.

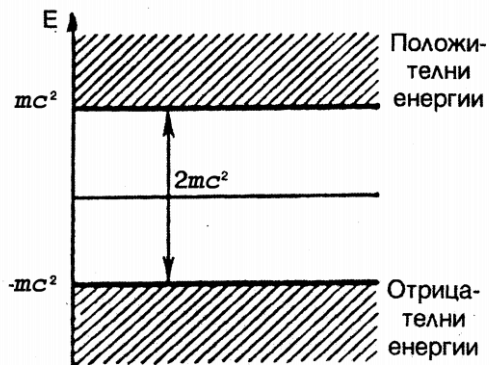
Първата открита елементарна частица е лептонът електрон. Ще разгледаме лептоните с електричен заряд – електроните, мюоните и таоните.

В гл. 4 описахме експеримента за вълновите свойства на електрона. В гл. 13 – състоянието му от неговия спин. Спинът ни позволява да обясним електронната структура и Периодичната система (използвахме нерелативисткото уравнение на Шрьодингер). С изключение на H-атома обаче движението на електрона е релативистко. Затова е коректно да се използва уравнението на Дирак. То позволява да получим точно спина на електрона и магнитния му момент. Най-интересен е парадоксалният резултат за положителна и отрицателна енергия на електроните:

$$E = \pm \sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2}. \quad (20.1)$$

Според Дирак електроните могат да заемат състояния с отрицателна енергия, които обхващат всички нива в областта на отрицателните енергии. Там те образуват електронно море, което е ненаблюдаемо. Ако на един такъв електрон се придаде енергия $> 2m_e c^2$, той ще премине в областта на положителните енергии (фиг. 20-1). В областта на отрицателните се образува ваканция, която е напълно аналогична на дупката в полупроводниците (гл. 16). Както в полупроводниците, дупката притежава заряд, противоположен на заряда на електрона в областта на положителната енергия. Някои теоретици смятат, че тази концепция не се потвърждава от съвременната теория на античастиците. Като оставим това мнение без коментар, ще подчертаем, че с тази интерпретация Дирак предсказа съществуването на позитрона, което по-късно е потвърдено експериментално!

Първата новооткрита елементарна частица след електрона е мюонът (μ^-). Тя има свойствата на e^- с изключение на масата $m_\mu = 106 \text{ MeV}$ (да



Фиг. 20-1. Електронът може да притежава както положителна, така и отрицателна енергия ($-m_e c^2 > E > m_e c^2$) – двете енергетични области са разделени от „забранена“ област.

припомним, че $m_e = 0,5 \text{ MeV}$, а $m_\mu \sim 10^3 \text{ MeV}$). Тя е силно нестабилна и времето ѝ на живот е $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. Разпада се по схемата



Неутриното също е лептон, но незареден. Както електронът мюонът има отрицателен заряд и положително заредена античастица μ^+ . Изследванията по разпадането на елементарните частици показват не само че електронът има „близнак“ в лицето на мюона, но и че в реакциите на двете частици неутрината се различават. Първоначално откритото неутрино (20.2) се нарича *електронно неутрино* (ν_e), а това, което „придружава“ мюона – *мюонно неутрино* (ν_μ). Реакцията за разпадането на неутрона (19.1) е коректно да запишем като:



При разпадането на мюона (19.3) неутриното и антинеутриното са експериментално идентифицирани съответно като мюонно и електронно:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e. \quad (20.4)$$

През 1975 г. в Стенфорд е открит нов много тежък лептон – *тау-лептонът*. Неговата античастица е лептонът τ^+ . Масата на τ -лептона е 1,8 GeV, което е почти два пъти масата на протона. Оказва се, че при разпадане на тау-лептона се получава трети вид неутрино – *τ -неутрино* ν_τ (съответстващото антинеутрино е $\bar{\nu}_\tau$).

При описанието на лептоните се въвежда *лептонно квантово число*, което често се нарича *лептонен заряд*. Съществуват три различни лептонни заряда: електронен L_e , мюонен L_μ и таонен L_τ (вж. § 19.3). Частиците, които не са лептони, имат число 0. Лесно може да се провери, че в горните реакции лептонното число преди и след реакцията не се изменя. Известно време се смяташе, че запазването на лептонното число е фундаментален природен закон и е напълно аналогичен на закона за запазване на заряда. Напоследък бяха открити осцилации на лептонното число (в това кратко изложение този въпрос не се разглежда).

Лептоните и τ^- имат спин $\hbar/2$ – те са фермиони. И накрая дебело ще подчертаем, че *лептоните се държат като точкови образувания и не притежават вътрешна структура*, т.е. те са фундаментални частици.

Да резюмираме кога и как са открити лептоните:

- електрон – 1897 г. от Дж. Дж. Томсън;
- позитрон – 1932 г. от Андерсън, предсказан от Дирак 1928 г.;
- неутрино – 1953 г. от Райнес и Коуен, предсказано от Паули 1930 г.;
- мюон – 1937 г. от Андерсън и Нидермайер;
- таон – 1975 г. от Праиз (Prise).

И накрая да обобщим главното за лептоните :

- електронът и мюонът и техните неутрина са широко срещани фундаментални частици във Вселената;
- таонът е твърде масивен, за да се произвежда естествено на сегашния етап на еволюцията на Вселената;
- тау-неутриното не се среща, защото таонът не се произвежда;
- според Стандартния модел всичките три неутрина имат нулева маса, но много експерименти показват, че неутрината могат да имат много малка маса (от порядъка на единици eV);
- експериментите за двойката електрон–неутрино от Слънцето са много и резултатите за броя им не са доста надеждни;
- в ядрените реакции запазването на електричния заряд се изпълнява;
- лептонните поколения изпитват само слабото взаимодействие.

§ 20.2. АДРОНИ

Логично е след лептоните да анализираме кварките. Но те са открити като съставни части на частици, наречени адрони. И не само откритието

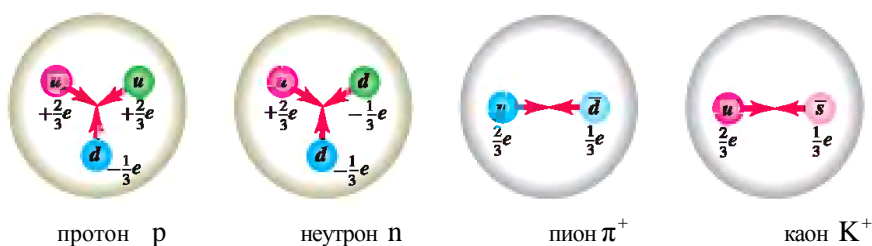
им, но и свидетелствата за съществуването им са свързани с адроните. Затова първо ще се спрем на адроните.

Адрони се наричат частиците, които участват в силните взаимодействия. Семейството на адроните има три клона: *бариони*, съставени от три свързани заедно кварка, *антибариони*, съставени от три свързани антикварка, и *мезони*, съставени от кварк и антикварк:



Първи това са предположили (1964 г.) американските физици Цвайг и Гел-Ман (кварковият състав на някои адрони е даден в табл. 20-2).

На фиг. 20-2 е показан кварковият състав на два бариона и два мезона.

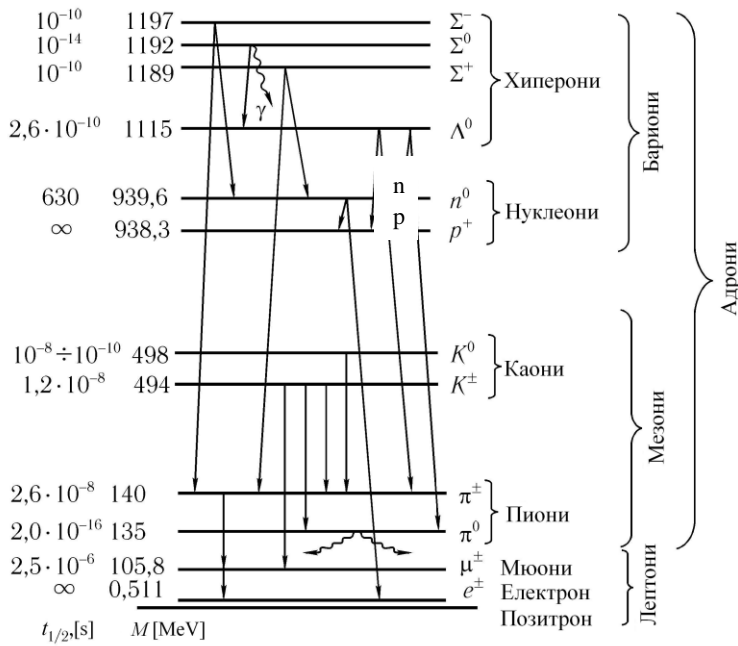


Фиг. 20-2. Кварков състав на протон, неутрон, положителни пион и каон (за подробности вж. табл. 20-2).

Адроните са най-многобройните елементарни частици – открити са повече от 400 адрона. В § 19.3 въведохме барионен заряд B . На всеки барион се присвоява барионен заряд $B=1$, на всеки антибарион – $B=-1$, а на мезоните – $B=0$. Много от свойствата, които ще споменем за барионите, са такива и за антибарионите. Затова няма да споменаваме изрично последните, освен ако те имат различна характеристика.

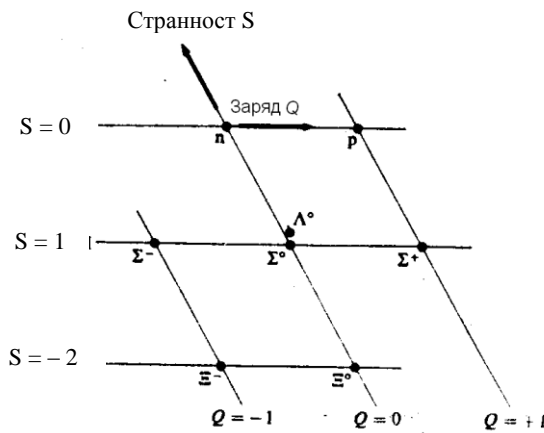
Барионите са фермиони – те имат полуцял спин и се разделят на *нуклеони* и *хиперони*. Добра представа за барионите дава схемата (макар и непълна) на фиг. 20-3, където са показани частици с маса до 1,2 GeV заедно с техните периоди на полуразпадане, масите им и означенията; със стрелки са изобразени възможните канали на разпадане.

Ще споменем една особеност, забелязана при някои адрони. Оказало се, че някои хиперони и каони участват в силните взаимодействия, а след това се разпадат за време $10^{-10}s$, характерно за слабите взаимодействия (други особености няма да коментираме). За обяснението им се въвело ново квантово число – *странност* S . На хипероните Σ^0 и Σ^\pm и на мезона K^- била присвоена странност $S=-1$, на хипероните Ξ^- и Ξ^0 : $S=-2$, на хиперона Ω^- : $S=-3$, на барионите $\Delta^0, \Delta^-, \Delta^+$ и Δ^{++} и нуклоните: $S=0$ (частиците, освен Σ^0, Σ^\pm и K^- , са с енергия, надвишаваща приетата на фиг. 20.3, и не са показани).



Фиг. 20-3. Елементарните частици с енергия до ~ 1 GeV. Отляво са периодът на полуразпадане и масите им, а отдясно – означенията и видът им; със стрелки са изобразени каналите на разпадане. (Не са показани неутрината, антинейтрината и таонът – той е с маса $m_\tau = 1,784$ GeV, която е по-голяма от показаната.)

Ако се начертаят диаграми в криволинейни неортогонални координати електричен заряд Q (в ядрената физика с q се означават кварките) и странност S , барионите образуват групи (фиг. 20-4 и фиг. 20-6). Да започнем с примера на фиг. 20-4. (Масата на тези адрони може да

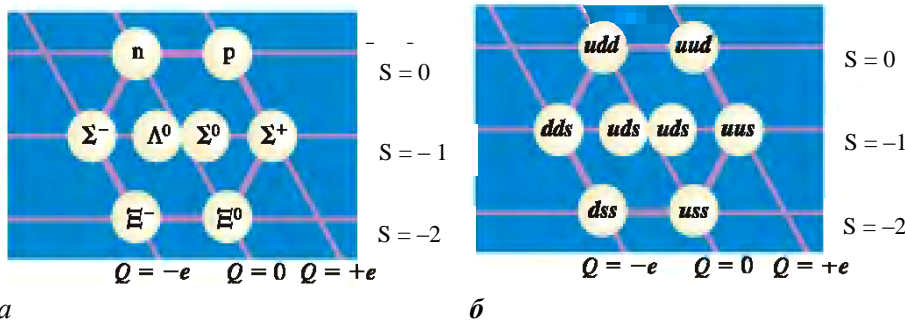


Фиг. 20-4. Октет бариони в афинна координатна система (времето им на живот $\sim 10^{-10}$ s).

бъде видяна в табл. 20.2 – те са по-леки от адроните на фиг. 20-6.)
 Горизонталните редове оформят *барионните семейства*, които са

съвкупност от подобни маси и еднакви вътрешни свойства. Горният ред оформя семейството на нуклоните, тъй като масите на двете частици са подобни (938 и 940 MeV) и с еднаква странност ($S=0$). Вторият ред – семейството на сигма (Σ) адроните с маси (1197, 1192 и 1189 MeV) и странност $S=-1$. И в най-долния ред – семейството на кси (Ξ) адроните със $S=-2$. Известността на всички тези споменати характеристики, преди да се узнае кварковата структура на адроните, е послужила като сериозно доказателство на Цвайг и Гел-Ман за откриване на кварките.

Строго се показва, че симетрията играе важна роля в теорията на частиците. Горните 8 бариона със спин $(1/2)\hbar$ – протонът, неутронът, странните хиперони $\Lambda^0, \Sigma^+, \Sigma^0$ и Σ^- и двойно странните Ξ^0 и Ξ^- , образуват симетрична хексагонална фигура от този мултиплет (октет) – фиг. 20-5.



а

б

Фиг. 20-5. а) Октет на 8 бариона със спинове $(1/2)\hbar$ в координатната система QS .

б) Кварков състав на барионите: на хипероните Λ^0 и Σ^0 е един и същ – Σ^0 е възбудено състояние на Λ^0 и може да се разпадне на него, излъчвайки фотон.

Такива картини се получават за много групи от адрони, а не само за тези на фиг. 20-4 и фиг. 20-6. Показаната симетрия може да се разглежда като основно свойство на адроните. Нойман (Neumann) и Гел-Ман осъзнават, че тази симетрия може да се обясни с теорията на групите. Обяснението им е наречено *осмичен път*. Използвайки го, Гел-Ман предсказал съществуването на частицата Ω^- (Ω^- е по-долу на фиг. 20-6), която по-късно е открита експериментално – това било грандиозен успех за теорията му.

Хипероните ламбда Λ^0 и сигма Σ^0 на фигурата се състоят от еднакви uds -кварки (вж. табл. 20-2). Масата им обаче е различна. Няма обективна причина двете частици да нямат еднакъв кварков състав.

Масата на барионите се определя от масата на съдържащите се в тях кварки. Но кварките заемат различни енергетични нива (масата им е различна в тези нива – вж. гл.1). Аналогично в атома електроните около ядрото имат различни енергетични нива (вж. например фиг. 12-2). Но в адроните енергетичното нива на кварките се определя от силното взаимодействие. А това води до значително влияние върху масите им – електронните енергетични нива допринасят пренебрежимо малко в масата на атома. Но не е така в обектите, образувани от кварки. Адроните, Σ^0 , Δ^+

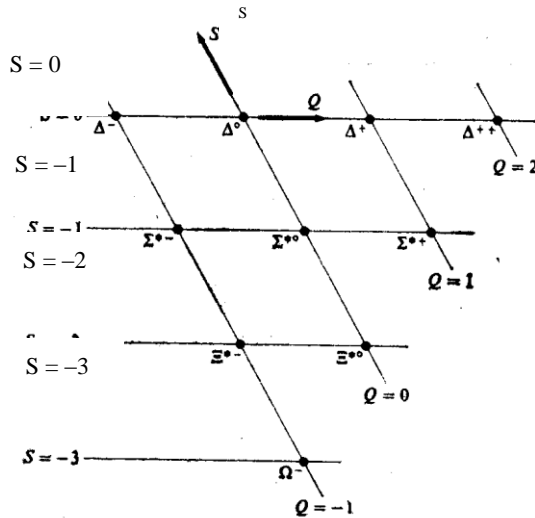
Таблица 20-2. Кваркова структура на някои мезони и бариони

Частица	Маса, MeV	$Q(e)$	От кварки	Частица	Маса, MeV	$Q(e)$	От кварки
π^+	140	+1	$u\bar{d}$	Σ^+	1189	+1	uss
π^0	135	0	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}^1$	Σ^0	1192	0	uds
π^-	140	-1	$\bar{u}d$	Σ^-	1197	-1	dds
K^+	494	+1	$u\bar{s}$	Δ^{++}	1236	+2	uuu
K^0	498	-1	$d\bar{s}$	Δ^-	1236	-1	ddd
\bar{K}^0	494	0	$\bar{u}s$	Ξ^-	1321	-1	dss
p	938	+1	uud	Ξ^0	1345	0	uss
n	940	0	udd	Ω^-	1672	-1	sss
Λ^0	1115	0	uds	η^0/η'^0	547/958	0	$u\bar{u}+d\bar{d}+s\bar{s}$

¹⁾ Пионът π^0 е неутрален и той би могъл да се състои от кварк и антикварк, $u\bar{u}$ или $d\bar{d}$, но поради силното взаимодействие тези кварк-антикваркови състояния могат да преминават едно в друго и затова пионът е суперпозиция от тези състояния.

и Δ^0 са ярка илюстрация за това. Те имат еднакъв кварков състав, но различни маси, тъй като кварките в тях са с различни енергетични нива. В барионния октет (фиг. 20-4 и фиг. 20-5) кварките са с ниски енергетични нива и следователно барионите от тях са с малка маса.

Аналогично на тази комбинация съществува съвкупност от qqq, в която кварките заемат високоенергетични нива. В комбинациите uuu, ddd и sss (това са Δ^{++} , Δ^- и Ξ^0 – табл. 20.2.) кварките могат да съществуват само във високоенергетични нива. Идентичните кварки не позволяват заемането на едно и също ниво (ниско) и с това забраняват създаването на бариони с малка маса. На фиг. 20-6 са групирани барио-



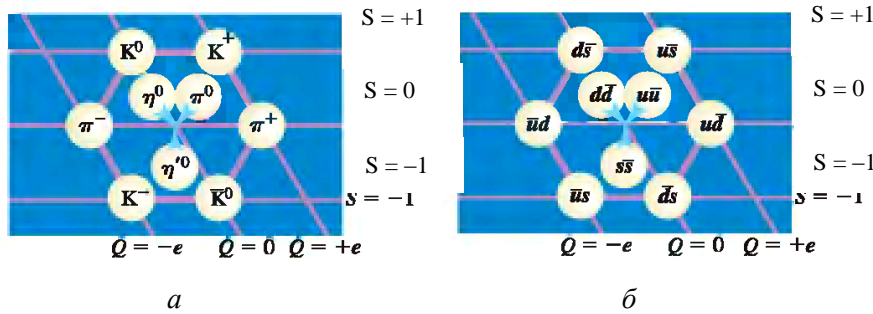
Фиг. 20-6. Декаплет бариони в координатната система QS – частиците имат време на живот 10^{-23} s, освен на $\Omega^- - 10^{-10}$ s. ($\Sigma^{*+}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*-}, \Xi^{*0}$ и Ξ^{*-} са във възбудени състояния.)

ни с голяма маса. Диаграмата е известна като *барионен декаплет* и обяснението е със същия (като на фиг. 20-4) осмичен път.

Първото делта-семейство съдържа частици, които са точно същата кваркова комбинация като на протона и неутрона – Δ^+ е от uud -кварки като протона, а Δ^0 е от udd -кварки като неутрона. По същество това са версиите с голяма маса на протона и неутрона. Но делта-семейството включва и барионите Δ^{++} и Δ^- , съставени от uuu - и от ddd -кварки.

Мезоните са бозони – имат цял спин. Преди бяха известни два вида – π -мезони и K -мезони, а днес и B -мезони и D -мезони. Те са открити в космическите лъчи. До 50-те години на XX в. откритието на елементарните частици е свързано с космическите лъчи. Те са високоенергетичните частици (главно ядра), идващи от Космоса. При удари с атомите на атмосферата пораждаат различни вторични частици със сложен състав. В тях са открити не само мезоните, а и позитронът, Λ -хипероните и др. После откритията и изследванията на елементарните частици се правят на ускорители.

Аналогично на барионните графики можем да начертаем графика на 9 мезона със спин 0 – фиг. 20-7 (тук три мезона не са показани на фиг. 20-3). Сега имаме нонет, но формата е на същата хексагонална фигура!



Фиг.20-7. а) Нонет на 9 мезона (същия осмичен път) всеки със спин 0 в координатната система QS . б) Кварков състав на мезоните.

В централния ред три от частиците, π^-, π^0 и π^+ , образуват семейството на пионите – най-леките и най-срещаните мезони. На същия ред са две други частици – етата η и η' . Пионът π^0 е суперпозиция от $u\bar{u}$ - и $d\bar{d}$ -кварки (за обяснението вж. надписа под табл. 20-2). Мезоните η и η' са различни суперпозиции от $u\bar{u}$ -, $d\bar{d}$ - и $s\bar{s}$ -състояния.

На първия и третия ред е семейството на каоните. Частици се разделят по стойността на странноста – за K^0 и K^+ $S=1$, а за K^- и \bar{K}^0 $S=-1$. Ще отбележим, че K^- е античастица на K^+ , а \bar{K}^0 – на K^0 . K^0 и \bar{K}^0 са различни частици, подобно на неутрона и антинейтрона. И в двата случая частиците и античастиците са с малка разлика в разпадните реакции.

§ 20.3. КВАРКИ

За откритите стотици адрони, от които показахме само някои, е ясно, че те не представляват фундаменталното ниво на структурата на материята. Основното съмнение, че адроните се състоят от нещо по-малко (от малки заряди), идва от неутрона. В гл. 17 показахме магнитния момент на неутрона. Но неутронът няма заряд или ако трябва да бъдем по-прецизни – няма сумарен заряд. Следователно възможно е да бъде изграден от по-малки частици, сумата от чиито заряди е нула. Ако е така, квантовото движение на тези частици би обусловило този изненадващ магнитен момент. За да докажем това предположение, трябва да проникнем в неутрона с нещо, което е по-малко от неутрона и е индиферентно към силното взаимодействие. Така то няма да взаимодейства с неутрона и ще проникне в него. Ако това нещо е заредено, то ще взаимодейства с малки зарядите, изграждащи неутрона. Нещото с такива свойства е електронът с енергия над 10 GeV. Експериментът е направен със SLAC (Stanford Linear Accelerator). Резултатът е подобен на разсейването на α -частиците от атома в опита на Ръдърфорд – електроните се разсейват от протона. Това е възможно само ако в неутрона има по-малки частици, чиито заряд е от порядъка на заряда на електрона.

Да повторим, *кварките са фундаментални частици* – те нямат вътрешна структура. Съществуват шест вида кварки или – кварки с шест аромата. Ароматът означава определена съвкупност от квантови числа (електричен заряд, барионен заряд, странност и т.н.). Основните характеристики на кварките са показани в табл. 20-3.

Таблица 20.3. Кварки

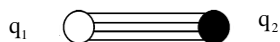
Название	Символ	Маса, MeV	Заряд		
			$Q(e)$	B	S
Горен	u	300	+2/3	1/3	0
Долен	d	300	-1/3	1/3	0
Странен	s	500	-1/3	1/3	-1
Очарован	c	1500	+2/3	1/3	0
Красив	b	5000	-1/3	1/3	0
Истински	t	175000	+2/3	1/3	0

Носителят на странност е s-кваркът – $S = -1$, а за останалите кварки $S = 0$.

Да подчертаем още един път, че кварките участват в силното взаимодействие. Слабите взаимодействия са универсални – фундаменталните бозони се излъчват и поглъщат и от лептоните, и от кварките. При това горният кварк се превръща в долен или обратно

В §19.5 подчертахме, че кварките имат цветен заряд – R (red), G (green) и B (blue). Антикварките притежават съответно цветовете $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$ (античервен, антизелен, антисин). Като отчетем, че всеки аромат може да има три цвята, е ясно, че съществуват 18 кварка и 18 антикварка. Счита се, че съвкупността от трите цвята става бяла, а двойката кварк–антикварк има „скрит“ цвят (например $(R\bar{R})$).

Всички експериментални опити да се раздели бял обект на два цветни (да се отдели един от кварките от адрона) са неуспешни засега. Логично възниква въпросът, а защо не може да се раздели бяла частица на две цветни? Защо не може да се отдели един от кварките от мезона или бариона? Невъзможността да се отдели кварк означава, че обмяната на цветни глюони води до взаимодействие, потенциалната енергия на което нараства с разстоянието. С други думи, силата на взаимодействието не намалява – тя или остава постоянна, или се увеличава. Работата на тази сила за отдалечаване на кварките на безкрайно разстояние е безкрайна. Едно от възможните обяснения е, че глюонното поле е съсредоточено в тясна област (в тясна тръба – в теорията на струните), съединяваща кварките – фиг. 20-8. Силовите линии на това поле са паралелни една на друга (подобно на линиите на електричното поле в плосък кондензатор). За разделянето на кварките трябва да придадем на частицата безкрайно голяма енергия, тъй като при нарастване на разстоянието енергията ѝ

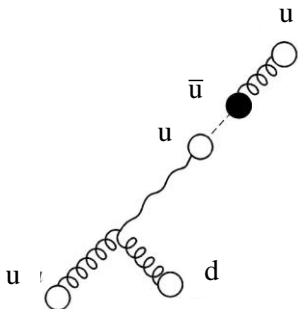


Фиг. 20-8. Струна между два кварка – линиите са силовите линии на глюонното поле.

намалява, а на тръбата (на струната) нараства. При достатъчно висока енергия струната се къса и се ражда двойката кварк–антикварк, т.е. кваркът се превръща в бял мезон – фиг. 20-9.

Кварките не могат да се разделят един от друг, т.е. те не могат да се наблюдават в свободно състояние. Хипотезата заточение (confinement) предполага, че за раздалечаването им е необходима безкрайна енергия и следователно е невъзможно.

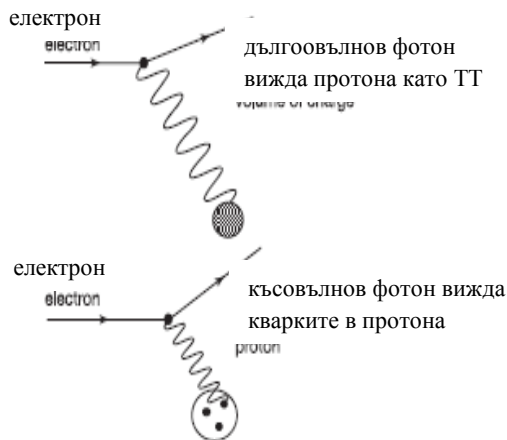
Ще засегнем кратко свидетелствата за съществуване на кварките. *Първото свидетелство е предположението на Гел-Ман и на Цвайг*, обясняващо редица свойства на адроните (например октетите от § 20.2).



Фиг. 20-9. Опит да се отдели оцветен кварк (u) от безцветния протон – след скъсване на струната вместо очакваните два цветни обекта от белия протон се получават два бели.

Второто свидетелство е от опитите по *нееластично разсейване на електрони от протон*. Това първо реално доказателство идва с резултатите от анализа на данните от експеримента на SLAC. Експериментът тематично е същият като ръдърфордовото разсейване (§ 4.5.): използват се частици, за да се пробва структурата на обект.

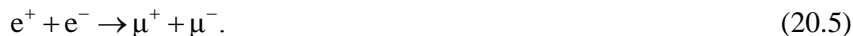
Използва се поток от електрони: лесно се произвеждат много от тях; те са с малка маса и лесно се ускоряват; не изпитват силно действие. В експеримента енергията на електроните в потока се изменя. За обяснение ще използваме картината на Файнман (фиг. 20-10). При ниски енергии електроните се движат бавно и е необходимо известно



Фиг. 20-10. Взаимодействие между електрона и протона.

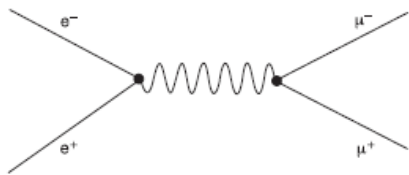
време да минат покрай протона. През това време много бързите кварки изминават голямо разстояние вътре в протона. Затова електронът „вижда“ осредненото сумарно поле около протона, създадено от всички кварки (не забравяме, че зарядът на протона е сума от зарядите на кварките в него). Това сумарно поле е с относителен нисък интензитет и електронът слабо се отклонява от своя път. Ако електронът има висока енергия, той преминава протона много бързо. За това малко време кварките изминават незначителни разстояния и електричното поле има отделни локализиращи области около тях. И минаващият през някоя от тези области електрон ще изпита силното влияние на полето и ще се отклони значително. Експериментите в SLAC се провеждат последователно много години и изследователите успяват да докажат, че в протона има три частици, които напълно съответстват на кварките на Гел-Ман и Цвайг.

Третото свидетелство са струите при аниhilация на две частици. Да си спомним коя реакция е аниhilация – тя е реакция на частица и античастица. Резултатът зависи от енергията на изходните частици. Най-често двете частици се превръщат във фотон(и). Но ако енергията им е достатъчна, те се материализират в друга двойка частица–античастица, каквато е една от най-често срещаните аниhilационни реакции:



Електромагнитното поле взема енергия от аниhilацията и после материализира нови частици от тази енергия (фиг. 20-11 – диаграма, известна като диаграма на Файнман). На диаграмата фотонът

представява енергията, вливаща се във и изтичаща от електромагнитното поле. Винаги при удара на частица с античастица барион-

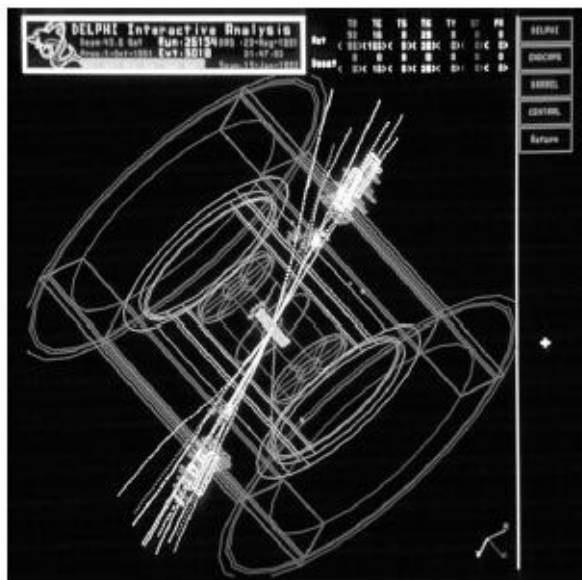


Фиг. 20-11. Аниhilация на една двойка частица–античастица, при което тя се материализира в друга двойка частица-античастица.

ният, лептонният и електричният заряд са нулеви, така че от аниhilацията могат да се образуват всякакви частици. Например реакцията



е винаги възможна, ако q и \bar{q} са с еднакъв аромат. Силното взаимодействие не позволява кварките да съществуват като самостоятелни обекти. Да предположим, че q и \bar{q} образуват мезон, като се движат, отдалечавайки се един от друг (нужно е да се запази импулсът на изходната система!). Кварките в мезона са свързани със струна на силното взаимодействие, чиято интензивност нараства с отдалечаването им (вж. обясненията към фиг. 20-8 и фиг. 20-9) – струната накрая се къса на два мезона. В резултат те на свой ред образуват потоци (два душа) от частици (фиг. 20-12).



Фиг. 20-12. Две струи, които се виждат в детектора DELPHI на ЦЕРН.

Потоците от частици са наречени струи и са убедително доказателство за съществуването на кварките.

§ 20.4. ГОЛЕМИЯТ ВЗРИВ И КОСМОЛОГИЯТА

20.4.1. Експериментални доказателства за Големия взрив

Познанията за еволюцията на Вселената, за нейния състав и структура са тясно свързани с ядрената физика и физиката на елементарните частици. Космологията се опира и на достиженията на тези науки (освен на астрономията и ОТО). Ако се окаже, че необходимите енергии за раждането на по-тежки частици от сега известните ни са недостижими на Земята, единствената възможност е астрофизическото изучаване на Космоса – изследванията на „остатъците“ (реликвите) от началото на Вселената.

С приносите на астрофизиката и физиката на елементарните частици космолозите са убедени, че имат "стандартен модел" как се е появила Вселената. Моделът се нарича *Големия взрив* (*Big band*). Нашите оценки са, че Вселената е на 15 млрд. години и тогава температурата ѝ е била 10^{33} К. Всички материални обекти са съществували в обем, много по-малък от днешния – по-малък даже от обема на Земята. Тогава е избухнал Големият взрив, свързан с експлозивно разширение на Вселената. Той е траел 10^{-35} s и обемът ѝ се е увеличил 10^{50} пъти. Какво е причинило Големия взрив? За съжаление ние не знаем. Днешните теории не работят при температури и налягания, съществували след Големия взрив. Обаче неочаквано надежда се появи с установената връзка между физиката на елементарните частици и физиката на ранната Вселена.

Преди да анализираме фактите, довели до създаване на модела на Големия взрив и развитието на космологията, да си спомним думите на известния Шерлок Холмс: "Капитална грешка е да се теоретизира, преди да имате всички доказателства". Ето ги тези доказателства – съвременната космология се базира на 4 фундаментални факта:

1. Изотропността на разпределението на материята в големи мащаби.
2. Постоянното отместване на спектралните линии към червената област на спектъра в резултат на разширяване на Вселената.
3. Количеството хелий във Вселената.
4. Реликтовото излъчване.

Ако предположим, че известните ни днес физични закони са в сила за цялата еволюция на Вселената, интерпретацията на тези четири експериментални факта води до извода, че началото на Вселената е мощна експлозия преди около $15 \cdot 10^9$ години. Реликтовото излъчване е истинният след това време „остатък“ от електромагнитни вълни, излъчени в определено време (при появата на възможност за това) след експлозията. Тази експлозия наричаме Големия взрив.

Първият факт е установен от астрономите при систематиката на звездите. Днес оценката е, че съществуват около 10^{12} галактики с маса 10^{53} kg (прието е в астрономията $10^{23} M_{\odot}$ ($M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30}$ kg е масата на Слънцето) и плътност на Вселената 10^{-27} kg/m³.

Вторият факт е залегнал в закона на Хъбл (Hubble): галактиките със скорост u имат червено отместване u/c (в пъти), което е пропорционално на отдалечеността d им от даден обект (например от Земята):

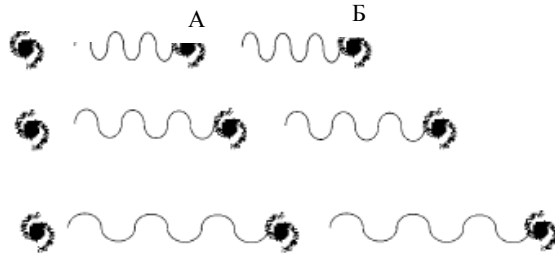
$$\frac{u}{c} = \frac{H}{c} d \quad \text{или} \quad u = Hd. \quad (20.7)$$

Коефициентът на пропорционалност $H=1.8 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ се нарича константа на Хъбл – законът на Хъбл дава възможност да намерим скоростта на звездата, галактиката и пр. спрямо Земята и да се определи възрастта на Вселената (за подробности вж. [1, § 12.2.1]).

(Разбира се, лесно се доказва, че законът е в сила за произволна точка от Вселената.) Това отместване е свързано с относителното движение на една галактика спрямо друга (въобще на произволен астрономически обект спрямо друг). (В класическата физика експериментално и теоретично е доказано, че ако източникът на вълни (всякакви) се движи, спектралните линии се отместват – при отдалечаване линиите се разреждат, а при приближаване – се съгъстват; това е ефектът на Доплер).

Обикновено в източниците отместването се обяснява с ефекта на Доплер. Той абсолютно правилно анализира закона на Хъбл и скоростта на галактиките спрямо Земята. Но той не е свързан със (не обяснява) същността на закона на Хъбл. Нещата стават ясни с теорията на руския метеоролог и математик Александър Фридман. Той намира серия от решения на уравненията на Айнщайн (вж. гл. 2), които са основа за съвременните работи по еволюцията на Вселената.

Фридман доказва, че космическото пространство не е празен обем, в който се движат галактиките, а *самото то се изменя*. Тъй като повечето хора не мислят за Космоса като за *нещо*, ще приведем примера на Алдей [1, ch.12] за мравките и надутия балон. Да си представим, че върху повърхността на балона са разположени мравки. Ако го надуем още повече, мравките ще се отдалечат една от друга, тъй като повърхността му се разтяга. От гледна точка на една мравка другите се отдалечават. Но мравките не се движат – увеличава се разстоянието между тях. Аналогично е и с галактиките – увеличава се разстоянието между тях. (Самите те не се разширяват поради действието на локалните гравитационни и електрически сили.) Разширяването на пространството е само в празнотата между галактиките и в увеличаване на дължината на светлината, която я пресича (фиг. 20-13). На картината е показано, че светлината е излъчена към нас от двете галактики А и Б. Всяка следваща схема дава разширяването на пространството между галактиките и увеличаването на дължината на светлината, излъчена от тях. Нека да вземем за пример, че за времето от 50% разширение светлината от А достига до нас с 50% червено отместване. Но светлината от Б се излъчва от два пъти по-далеч и още не ни е достигнала (тя е стигнала само до А с 50% червено отместване). Тя ще има други 50% отместване, докато достигне до нас от А.



Фиг. 20-13. Разширяване на пространството и изменение на дължината на вълна на светлината в него.

Така че отместването от Б ще бъде значително по-голямо спрямо това от А, защото Вселената се е разширила много повече за времето, докато светлината е дошла до нас.

Законът на Хъбл е следствие от разширяване на пространството, през което се движи светлината. Така че червеното отместване на Хъбл не е истински доплеров ефект (изчисленията на базата на последния са абсолютно верни, но фактът е в разширяване на пространството). Фридмановата теория убедително обяснява закона на Хъбл на основата на ОТО. Да отбележим, че в това обяснение не е *нужна физиката на елементарните частици!*

Разширяването на пространството води до логичното заключение, че Вселената е трябвало да премине през състояния с много по-високи плътност и температура. В такова състояние *физиката на елементарните частици играе съществена роля*. А от тук идва и естественото обяснение за третия факт – количеството на хелий във Вселената, и за четвъртия – реликтовото излъчване. За тяхното обяснение ни е необходима историята на еволюцията на Вселената, която се предопределя от физиката на елементарните частици.

Третият факт

Най-големият успех на теорията на Големия взрив е съпадението на предсказаното отношение на ядрата на ${}^4\text{He}$ (и на най-леките ядра) с наблюдаваните стойности.

Четвъртият факт е откритието на Пензиъс и Уилсън. През 1965 г. те откриват, че във Вселената съществува излъчване на спектър на абсолютно черно тяло с $T^0 = 2,7 \text{ K}$.

20.4.2. Кратка история на еволюцията на Вселената

Най-напред кратко ще поясним понятието *критична температура*, което ще използваме. В газа средната енергия е $\bar{E} = (3/2)kT^0$. За оценка във физиката на елементарните частици ще приемем $\bar{E} \approx kT^0 \Rightarrow T^0 \approx \bar{E}/k$, като отбележим че множителят $3/2$ варира за различните частици, но в общия случай е ~ 1 . Да вземем за пример протона. Ако температурата (на Вселената) е $T^0 = m_p c^2 / k$, то \bar{E} на протоните е $\bar{E} = m_p c^2$. Ако температурата е достатъчно висока, е възможна реакцията

$$\gamma + \gamma \rightarrow p + \bar{p}. \tag{20.8}$$

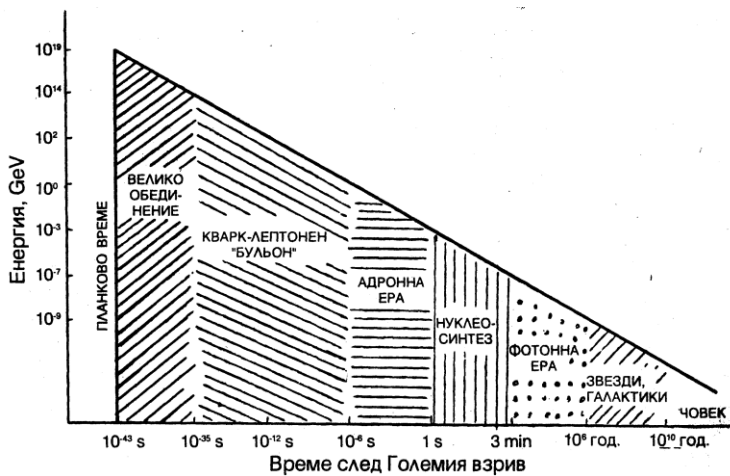
При $T^0 < m_p c^2 / k$ реакцията не е възможна. Следователно $T^0 = m_p c^2 / k$ е критична температура за протоните. Аналогично за другите частици масата им определя тяхната критична температура. За някои частици тя е дадена в табл. 20-4. За всяка фиксирана частица има критична температура. При разширяване на Вселената тя изстива и постепенно отпада създаването на частици (отпада дотогава съществуващата реакция за създаване на съответната частица).

Строим ранната еволюция на Вселената, използвайки знанията за субатомните частици и взаимодействията между тях. Качествената схема е показана на фиг. 20-14. Времето от $t = 0$ до $t = 10^{-43}$ s се нарича Планкова ера ($T^0 = 10^{32}$ K, $\rho = 10^{96}$ kg/m³). Прието е, че през това време

Таблица 20-4. Критична температура на някои частици

Частици	Маса (MeV / c ²)	Критична температура (×10 ⁹ K)
p	938	10 888
π ⁺	140	1 620
e ⁻	0,5	6
μ ⁻	106	1226

четирите взаимодействия са обединени. Често за обединеното

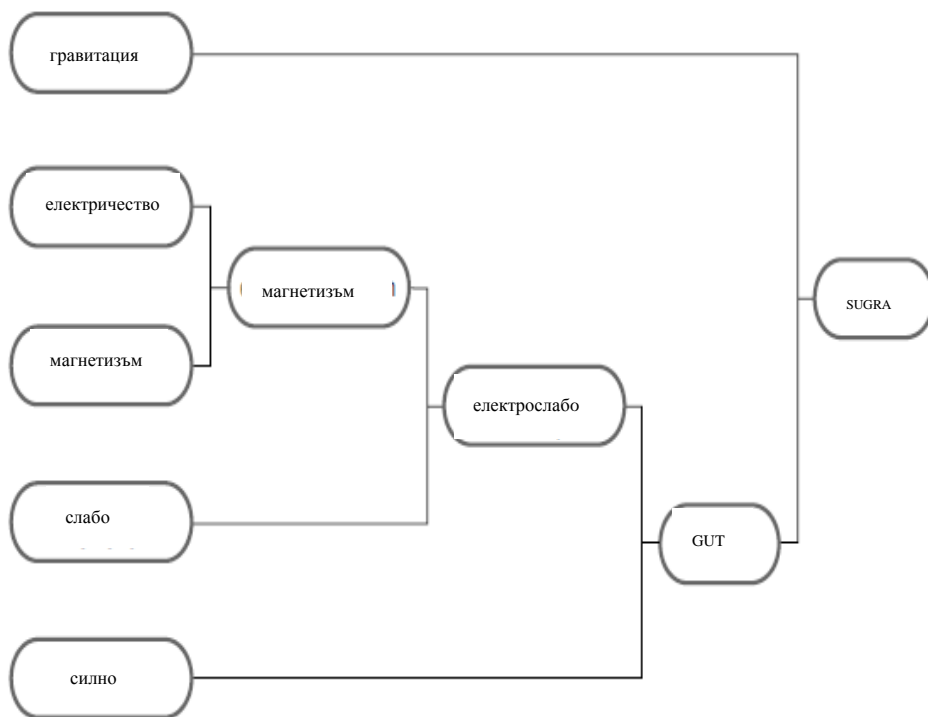


Фиг. 20-14. Схема на еволюция на Вселената.

взаимодействие се използва понятието супергравитация.

Въобщо с течение на времето материята изстива и първо се отделя гравитацията, след това – силното взаимодействие и накрая се разделят елек-

тромагнитното и слабото (фиг. 20-15). Гравитацията се отделя след 10^{-43} s и започва *ерата на Великото обединение* (теории GUT's – § 19.5). След 10^{-35} s се отделя силното взаимодействие. Поради бързото разширяване на Вселената (инфлационна фаза) размерите ѝ се увеличават с 50 порядъка. До 10^{-6} s състоянието ѝ представлява горещ кварк-лептонен бульон – *Ера на кварковата плазма*. При високата температура кварките са свободни. При $t=10^{-6}$ s тя пада до $T^0=10^{13}$ K и започва образуването на адрони – *Адронната ера*. Енергията на този период и на следващите е постигната със създадените ускорители и имаме достатъчно знания за процесите. През тази ера се образуват протони и неутрони и се разделят електромагнитните и слабите взаимо-



Фиг. 20-15. Различните взаимодействия в Теорията на всичко.

действия. Свободни кварки вече не съществуват. Настъпва обща аниhilация на p с \bar{p} и n с \bar{n} . След аниhilацията във Вселената има един протон на всеки 10^9 фотона. Това число днес е измерено и се оказва сравнимо с предсказанията на GUT's. В периода плътностите на материята и енергията са достатъчно големи за реакциите на неутрината:

$$\begin{aligned}
 \bar{\nu}_e + p &\rightarrow n + e^+, & \nu_e + n &\rightarrow p + e^-, \\
 e^- + p &\rightarrow n + \nu_e, & e^+ + n &\rightarrow p + \bar{\nu}_e.
 \end{aligned}
 \tag{20.9}$$

Към края на ерата енергията на неутрината намалява и малката разлика в масите на неутрона и протона става съществена за горните реакции – първата и третата реакция се извършват все по-рядко в сравнение с втората и четвъртата. Затова с течение на времето (с възрастта на Вселената) се увеличава трансформацията на неутроните в протони. И към края на ерата има 82% протони и 18% неутрони.

Една секунда (по-точно 1,09 s) след Големия взрив температурата пада до $T^0 = 10^{10}$ K и плътността е такава, че неутрината не могат повече да взаимодействат с материята. Те не изчезват – остават вътре във Вселената. При това положение реакциите (20.9) спират и ние влизаме в *Ерата на нуклеосинтеза*. В интервала $1\text{ s} \div \sim 3\text{ min}$ протича ядрен синтез, познат под името нуклеонен синтез (в началото на периода температурата е висока и фоторазцепването на образувалите се прости ядра настъпва веднага). През него се синтезират най-леките ядра – на деутерий, тритий, хелий и т.н.:



Главният резултат от тези реакции е създаването на ${}^4\text{He}$. През нуклеосинтеза свободните неутрони, които преди него се разпадаха, се свързват в ядра. Под влияние на силните взаимодействия между протоните и неутроните в тях те престават да се разпадат и се стабилизират. Нуклеосинтезът изменя отношението p/n на 87/13. На всеки 200 частици 26 неутрона ще се съединят с 26 протона и ще формират 13 ядра на хелий. Така че масата на хелиевите атоми ще бъде

$$(13 \times 4) / 200 = 26\%. \tag{20.11}$$

Най-големият успех на теорията на Големия взрив е съвпадението на предсказаното отношение на ядрата на ${}^4\text{He}$ с наблюдаваните стойности. Много по-строгите пресмятания (не като оценката по-горе) дават следните резултати за ядрата на: хелий 24 ÷ 25% , деутерий 01% и литий $10^{-7}\%$. Във Вселената има 24% α -частици и 76% протони. Температурата е достатъчно висока и не се образуват атоми на елементите. Едва след около 10^6 години температурата пада до 2000 K и става възможно свързването на ядрата и електроните в неутрални атоми.

Следващата *Фотонна ера* продължава 10^6 години (в много книги е дадена цифрата 300 000). Най-характерното за нея е силната връзка между веществото и лъчението. В началото енергията на фотоните е достатъчна да йонизира H-атомите, образуващи се от протоните и

електроните. По-късно енергията на фотоните намалява и електроните лесно и бързо се комбинират с протоните. Вселената престава да се състои от огромно число заредени частици. Поради енергетичната недостатъчност на фотоните, те няма с какво да взаимодействат, т.е. льчението започва да се отделя от веществото (в края на Фотонната ера). Започва т. нар. Прозрачна ера. Фотоните не изчезват. Те продължават да съществуват във Вселената и да изпитват червено отместване от разширение ѝ. Около 15 млрд. години по-късно те са наблюдавани с микровълнова антена и стават известни като реликтовото излъчване.

След Фотонната настъпва следващата ера – започва образуването на звездите и галактиките. Флуктуацията на плътността в огненото кълбо от ядра на Н и He постепенно поражда неустойчивости, в резултат на които веществото се разбива на парчета, свива се под действие на гравитационните сили и започва образуването на звездите и галактиките. (С много от тези неустойчивости физиците се сблъскват дълго при опитите да овладеят УТС.) През последните 15 години се развива една друга хипотеза – принципът за неопределеност може да бъде отговорен за формирането на галактиките. В началото на параграфа подчертахме че Вселената е минала през много голямо драматично разширение. Предполага се, че то се е управлявало от квантово поле. Тогава принципът за неопределеност на енергията и времето се е отразил на части от полето, които са имали малко повече енергия от другите части. Това евентуално е превърнало части от Вселената малко по-плътни от другите – евентуално тези флуктуации на плътността са се развили до голямомасштабната структура, която виждаме днес.

При гравитационното свиване веществото става все по-плътно и се нагрива. При това в звездата се запазва равновесието между силите на гравитационното привличане и налягането на излъчването, което им се противопоставя. Намаляването (изгарянето) на Н води до намаляване на излъчването на фотони и неутрина. Няма какво да компенсира силите на привличане и равновесието се нарушава. В звездата настъпва ново гравитационно свиване и плътността се увеличава. В резултат стават възможни сливанията на ядрата на He и се образуват C, O, Ne и т.н. Масите на звездите силно се различават и в тях протичат различни цикли на ядрен синтез. Няма да се спираме на тези цикли. Любопытният читател ще ги намери в сбитото изложение в [4, § 14.1 ÷ 14.3].

Реакциите на синтез на леките елементи са енергетически изгодни. Това води до образуване на нови елементи. Специфичната енергия на свързване е най-голяма при желязото. Това означава прекратяване на реакциите на синтез – при достигане до желязото то вече не може да бъде ядрено гориво. Именно с това се обяснява фактът, че от елементите с масово число, по-голямо от 30, желязото е най-разпространено в природата. Изобщо в звездите има тежки елементи с $A > 56$, т.е. по-тежки от желязото. Но синтезът приключва при него. Откъде се взимат? За образуването на тези елементи основна роля играят неутроните. Процесите с тежките елементи нямат съществен принос в ядрената енергия на звездите. Последователното залавяне на неутроните води до образуване на все по-тежки ядра.

Въпреки че от първите реакции на звезден ядрен синтез, при който се образуват тежки елементи, са изминали почти години, той не е променил съществено състава на Вселената в сравнение с този след Нуклеосинтезната и Фотонната ера. И днес във Вселената отношението на масите хелий към водород е около 24% към 76%.

20.4.3. Хелиевото количество и реликтовото излъчване

Работите на Фридман водят до убедително обяснение на закона на Хъбл – и това обяснение произтича естествено от ОТО: космическото пространство се разширява. Но ако се върнем назад в това разширение на космическото пространство, ние логично трябва да предположим, че Вселената е преминала през етап, в който плътността и температурата ѝ са били много по-големи, отколкото сега. Но на такъв етап физиката на елементарните частици играе определяща роля. Именно тя дава обяснение на количеството хелий и на реликтовото излъчване.

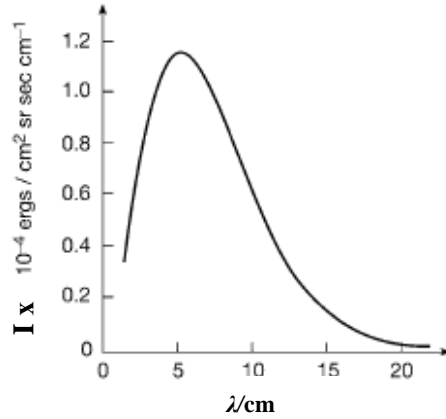
Вселената се състои от ~ 75% H и ~ 25% He. Всички елементи по-тежки от He (большинството наблюдаваме на Земята) са пренебрежимо малко (всяка теория за Вселената трябва да обясни количеството на елементите). В историята на еволюцията разгледахме звездния синтез. Елементите в звездите се образуват чрез ядрен синтез. Идеята принадлежи на Бурбидж (Burbidge), Фаулър (Fowler) и Хойл (Hoyle) и е публикувана през 1957 г. Оттогава астрофизиците теоретично и експериментално са доказали, че по-тежките елементи са образувани с ядрен синтез от полеките в звездите. Обаче количеството на хелий в днешната Вселена не може да бъде обяснено по този начин. Причините за това са две.

Първата е експерименталното доказателство, че количеството на хелий в звездите **не зависи** от тяхната възраст. Ако зависеше, хелият в много старите звезди, от които са се образували по-тежките елементи, би трябвало да бъде по-малко от този в младите звезди (образуването на тежките елементи е продължило по-дълго). Но такива факти няма.

Втората е в процеса на получаване на хелий от водород. В гл. 18 видяхме (18.32), че при това получаване се отделя огромна енергия (на този принцип е направена водородната бомба). Отделянето на такава енергия би направило звездите много по-ярки, отколкото те са.

Отговорът на въпроса за **третия факт** бе даден по-нагоре – това количество хелий е създадено не в звездите, а по-рано, по време на Ерата на нуклеосинтеза.

Доказателството за **четвъртия факт** е основано на откритието на Пензиъс (Penzias) и Уилсън (Wilson). През 1965 г. те откриват, че във Вселената съществува излъчване със спектър на АЧТ (вж. § 4.1). Това излъчване е с еднаква интензивност от което и да е направление на пространството и което и да е време от деня и нощта. След много експерименти и технически проверки те са били принудени да приемат, че излъчването идва от Космоса. Измерванията убедително са показали, че излъчването има спектър на АЧТ с температура $T^0 = 2,7 \text{ K}$ (едно съвременно измерване е показано на фиг. 20-16).



Фиг. 20-16. Резултати от инструмента Far Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS) на спътника COBE (COsmic Background Explorer). Кривата показва интензитета I на спектъра на аболотно черно тяло при фиксирана температура.

Днес този спектър е измерен много прецизно и точно.

РЕЗЮМЕ

Лептоните за разлика от кварките могат да съществуват като отделни обекти. Затова реакциите им са по-лесно обясними и достъпни. Лептоните сравнително лесно могат да бъдат намерени в природата.

Първата открита елементарна частица е лептонът електрон. Лептони с електричен заряд са електронът, мюонът и таонът. Позитронът, античастицата на електрона, теоретично е предсказан от Дирак и по-късно е потвърден експериментално. Мюонът има отрицателен заряд e , масата му е $m_{\mu} = 106 \text{ MeV}$ (а на електрона е $0,5 \text{ MeV}$), а античастицата μ^{+} е положителна. През 1975 г. е открита τ -частицата (тау-лептона), която е два пъти по-тежка от протона. Античастицата ѝ е лептонът τ^{+} . Неутриното също е лептон, но незареден. Съществуват три различни неутрина: електронно ν_e , мюонно ν_{μ} и τ -неутрино ν_{τ} . Съответстващите им антинеутрина са $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_{\mu}$ и $\bar{\nu}_{\tau}$.

При описанието на лептоните се въвежда лептонно квантово число, което съответства на лептонния заряд. Съществуват три различни лептонни заряда: електронен L_e , мюонен L_{μ} и таонен L_{τ} .

Адроните са частици, участващи в силните взаимодействия. Те имат три клона: бариони, съставени от три свързани кварка, антибариони – от три свързани антикварка, и мезони – от кварк и антикварк

Барионите са фермиони – те имат полуцял спин. Разделят се на нуклеони и хиперони. За обяснение на някои специфични свойства на барионите се въвежда квантовото число странност S . Хипероните Σ^0 и Σ^{\pm} (и възбудените им състояния) и мезонът K^{-} имат странност $S = -1$,

хипероните Ξ^- и Ξ^0 (и възбудените им състояния) $-S = -2$, хиперонът $\Omega^- - S = -3$, а барионите $\Delta^0, \Delta^-, \Delta^+$ и Δ^{++} и нуклоните $-S = 0$.

Мезоните са бозони – те имат цял спин. Известни са следните видове мезони: π -мезони, K-мезони, V-мезони и D-мезони.

В криволинейна неортогонална координатна система QS барионите образуват хексагонални фигури: леките бариони – като октет, тежките – като декаплет, а мезоните – като нонет. Това подреждане е стимулирало Нойман и Цвайг да създадат обяснение чрез абстрактната теория на групите, което се нарича осмичен път. В тежките бариони кварките заемат възбудени високоенергетични нива. В тези нива за разлика от нивата на електроните в атома енергията е толкова висока, че значително се изменя масата на кварките, а оттука и масата на барионите, които образуват.

Адроните се състоят от три силно взаимодействащи частици – кварки. Кварките са фундаментални частици – нямат вътрешна структура. Днес е прието, че съществуват шест вида кварки, или кварки с шест аромата: горен (up) u , долен (down) d , странен (strange) s , очарован (charm) c , красив (beauty) b и истински (truth) t (понякога b - и t -кварките ги наричат bottom- и top-кварки). Ароматът означава определена съвкупност от квантови числа (електричен заряд, барионен заряд, странност и т.н.). Кварките u , c и d се наричат горни кварки (електричен заряд $2/3e$), а кварките d , s и b – долни кварки (електричен заряд $-1/3e$). Носител на странността е s -кварка със странност $S = -1$.

Кварките имат цветен заряд – R (red), G (green) и B (blue). Антикварките притежават съответно цветовете $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$ (античервен, антизелен, антисин). Счита се, че съвкупността от трите цвята става бяла. Всички експерименти (много) да се раздели един бял обект на два цветни (да се отдели кварк от мезона или бариона) са неуспешни засега. Невъзможността да се отдели кварк означава, че обмяната на цветни глюони води до взаимодействие, потенциалната енергия на което нараства с разстоянието. С други думи, силата на взаимодействието не намалява – тя или остава постоянна, или се увеличава.

Има три свидетелства за съществуването на кварките. Първото е предположението на Гел-Ман и на Цвайг за обясняването на редица свойства на адроните. Второто е от опитите по нееластично разсейване на електрони от протон. Третото са струите при аниhilация.

Съвременната космология се базира на 4 фундаментални факта:

1. Изотропността на разпределението на материята в големи мащаби.
2. Постоянното отместване на спектралните линии към червената област на спектъра в резултат на разширяване на Вселената.
3. Количеството хелий във Вселената.
4. Реликтовото излъчване.

Първият е установеното от астрономите изотропно разпределение на материята. Вторият е залегнал в закона на Хъбл: галактиките със скорост u имат червено отместване u/c , пропорционално на отдалечеността d им от даден обект – $u/c = (H/c)d$ или $u = Hd$. Отместването е резултат не от движението на галактиките, а от разширението на

пространството. Законът на Хъбл е следствие от разширяване на пространството, през което се движи светлината. Фридмановата теория убедително обяснява закона на Хъбл на основата на ОТО. Третият е количеството хелий във Вселената – 24%. Четвъртият е основан на откритието на Пензиъс и Уилсън (1965 г.) – във Вселената съществува излъчване с еднаква интензивност от което и да е направление на Космоса и със спектър на АЧТ и температура $T^0 = 2,7 \text{ К}$.

Интерпретацията на тези четири експериментални факта води до извода, че преди $15 \cdot 10^9$ години е станала мощна експлозия, която наричаме Големия взрив. Непосредствено след него температурата е много висока. Времето от $t=0$ до $t=10^{-43} \text{ s}$ се нарича планкова епоха. През това време четирите взаимодействия са обединени – супергравитация. След отделянето на гравитацията (след 10^{-43} s) започва Ерата на Великото обединение. След 10^{-35} s се отделя силното взаимодействие и настъпва Ерата на кварковата плазма. Поради високата температура кварките са свободни. С изстиване на материята първо се отделя гравитацията, след това – силното взаимодействие и накрая се разделят електромагнитното и слабото взаимодействие.

При $t=10^{-6} \text{ s}$ температурата пада до $T^0=10^{13} \text{ К}$ и започва образуването на адрони – настъпва Адронната ера. Една секунда след Големия взрив температурата пада до $T^0=10^{10} \text{ К}$ и настъпва Ерата на нуклеосинтеза. През периода от $1 \text{ s} \div \sim 3 \text{ min}$ протича ядрен синтез, наречен нуклеонен синтез. През него се синтезират най-леките елементи. Най-големият успех на теорията на Големия взрив е съвпадението на предсказаното отношение на ядрата на ${}^4\text{He}$ с наблюдаваните – 24%.

Следващата, Фотонна ера продължава 10^6 години. С разширяването на Вселената енергията на фотоните намалява и поради енергетичната недостатъчност те няма с какво да взаимодействат, т.е. лъчението започва да се отделя от веществото (в края на ерата). Започва тъй наречената Прозрачна ера. Фотоните не изчезват. Те продължават да съществуват във Вселената и да изпитват червено отместване от разширението ѝ. Около 15 млрд. години по късно те са наблюдавани с микровълнова антена и стават известни като реликтовото излъчване.

След Фотонната настъпва следващата ера на Вселената, в която живеем и днес – започва образуването на звездите и галактиките.

ВЪПРОСИ

1. Кои частици са лептони?
2. Какво е позитрон?
3. Коя частица е мюон?
4. Коя частица е таон?
5. Колко вида неутрина има?

6. Какво изразява лептонното квантово число?
7. Какво взаимодействие изпитват лептоните?
8. Кои частици са адрони?
9. От кои частици се състоят адроните?
10. От какви видове частици се състоят мезоните?
11. От какви видове частици се състоят барионите?
12. Какво представлява странността и коя частица я носи?
13. Колко и какви аромати имат кварките?
14. От колко кварки се състоят мезоните? А барионите?
15. На кои фундаментални факти се базира съвременната космология?
16. По какво се съди за разширяването на Вселената?
17. Как се обяснява наблюдаваното количество хелий?
18. Кое излъчване е реликтово?
19. По какво се различават нуклеосинтезът и звездният ядрен синтез?
20. Как в звездите се образуват ядрата на леките и тежките елементи?

ЗАДАЧИ

Авторите си дават сметка, че физиката на елементарните частици ще затрудни читателите. Затова даваме задачите с решения.

1. Възможни ли са следните разпадания на частиците:
 - а) $\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$, б) $\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$, в) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_\mu$, г) $p \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$,
 - д) $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \mu^-$? Ако не са, каква е причината?

Решение

За решението са ни необходими знанията от § 19.2 и § 19.3.

- а) Подборните правила за изменението на странността са $\Delta S = 0, \pm 1$, а в разпадането $\Delta S = 2$ – не може.
 - б) В това разпадане $\Delta S = 2$ – не може.
 - в) В това разпадане се нарушава законът за запазване на лептонните заряди L_e и L_μ – не може.
 - г) В това разпадане се нарушават законът за запазване на барионния заряд B и законът за запазване на лептонния заряд L_μ – не може.
 - д) В това разпадане се нарушава законът за запазване на лептонния заряд L_μ – не може.
2. Защо Λ -хиперонът не може да се разпадне на π^+ - и π^- -мезони?

Решение

За решението са ни необходими знанията от § 19.2 и § 19.3.

При това разпадане се нарушават законите за запазване на барионния заряд и на изотопичния спин – не може.

3. Проверете лептонните квантови числа за следните разпадания:
 - а) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, б) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, в) $\pi^0 \rightarrow \mu^- + e^+ + \nu_e$.

Решение

Във всяко от тези разпадания няма тау-лептон. Така че преди и след разпадането L_τ се запазва.

а) Началните числа са $L_e=0$ и $L_\mu=-1$. Крайните – $L_e=-1+1+0=0$ и $L_\mu=0+0+(-1)=-1$. Лептонните числа се запазват.

б) Всички начални лептонни числа са нула (π^- -мезонът не е лептон). Крайните стойности са $L_\mu=1+(-1)=0$ и $L_e=0$. Лептонните числа отново се запазват.

в) Всички начални лептонни числа отново са нула. Крайните са $L_e=-1+1+0=0$ и $L_\mu=1+0+0=1$. Така L_μ не се запазва.

4. Възможни ли са следните разпадания на частиците:

а) $\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$, б) $\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$, в) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_\mu$, г) $p \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$,

д) $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \mu^-$?

Ако не са, каква е причината?

Решение

За решението са ни необходими знанията от § 20.1 и § 20.3.

а) Подборните правила за изменението на странността са $\Delta S=0, \pm 1$, а в разпадането $\Delta S=2$ – не може.

б) В това разпадане $\Delta S=2$ – не може.

в) В това разпадане се нарушава законът за запазване на лептонните заряди L_e и L_μ – не може.

г) В това разпадане се нарушават законът за запазване на барионния заряд B и законът за запазване на лептонния заряд L_μ – не може.

д) В това разпадане се нарушава законът за запазване на лептонния заряд L_μ – не може.